

CERN-COMPASSにおける 核子スピン構造研究

堂下典弘
山形大学

山形大学、宮崎大学、中部大学、KEK

固体偏極標的（冷却、NMR、マイクロ波、真空）



COMPASS実験：核子スピン構造研究
(約 2 2 0 名の共同研究者)

発表内容

- COMPASS実験の概要
- COMPASS実験の目的
- これまでの実験結果
- 将来の実験計画
- COMPASS偏極標的システム

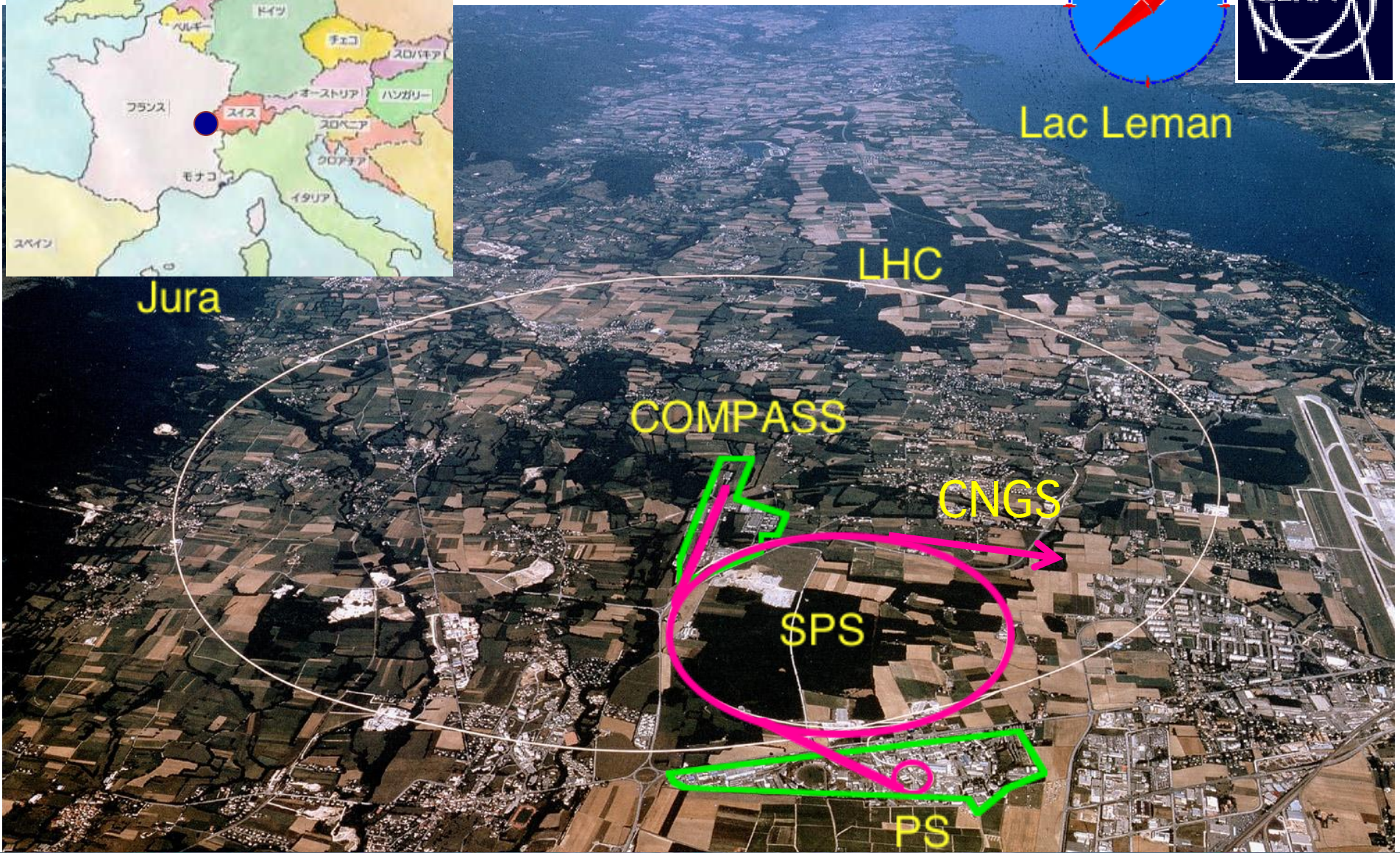
CERN と COMPASS実験



Lac Lemman



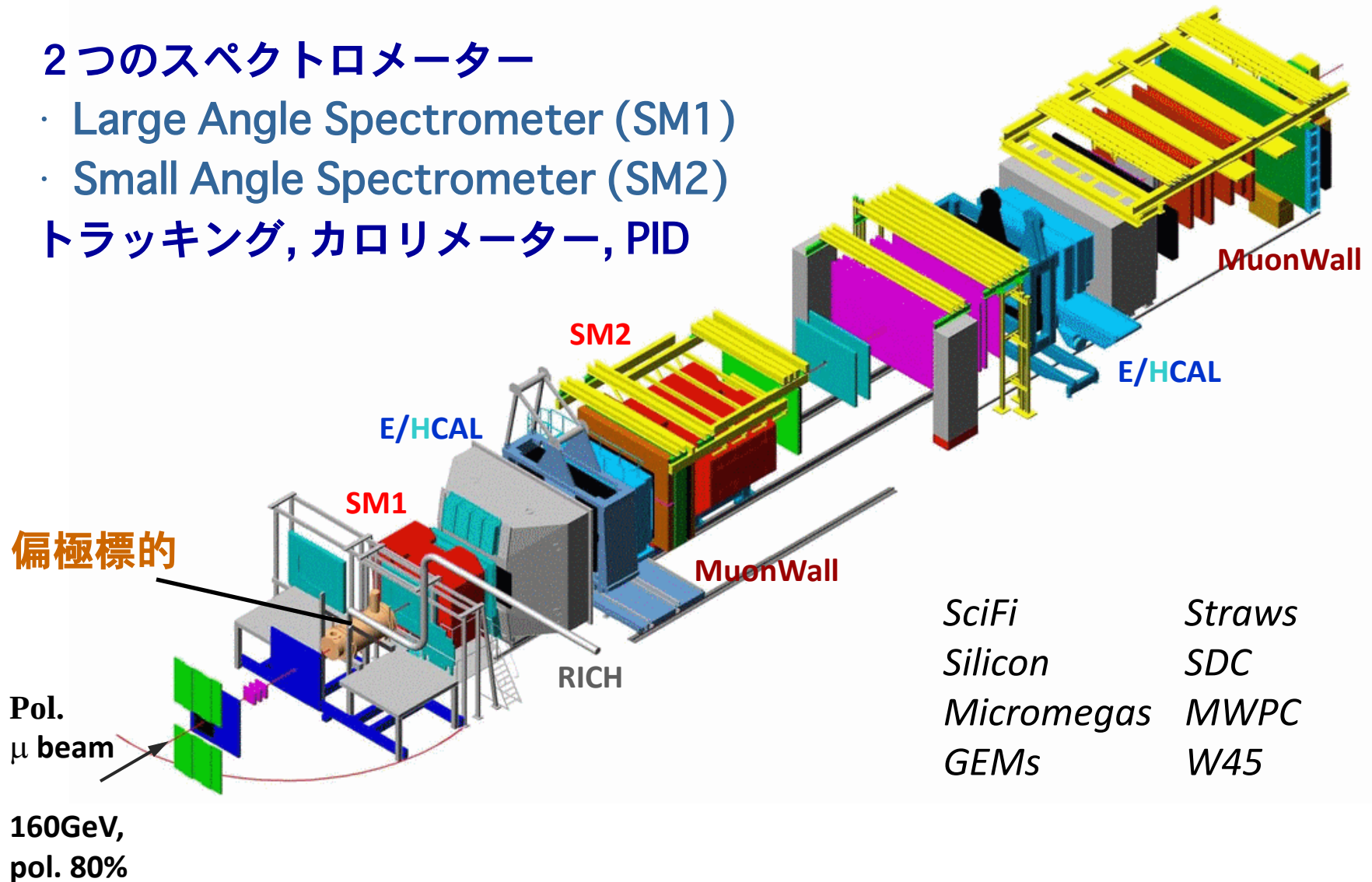
Jura



COMPASSスペクトロメーター

2つのスペクトロメーター

- ・ Large Angle Spectrometer (SM1)
 - ・ Small Angle Spectrometer (SM2)
- トラッキング, カロリメーター, PID



COMPASS の歴史

- 1 9 9 6 年にスタート
 - Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy
- 1 9 9 8 年プロポーザルが承認
- 2 0 0 2 年データ収集開始
- 毎年半年間のビームタイム
- 2 0 1 1 年終了
- 2 0 1 2 年COMPASS II データ収集開始

核子スピン構造

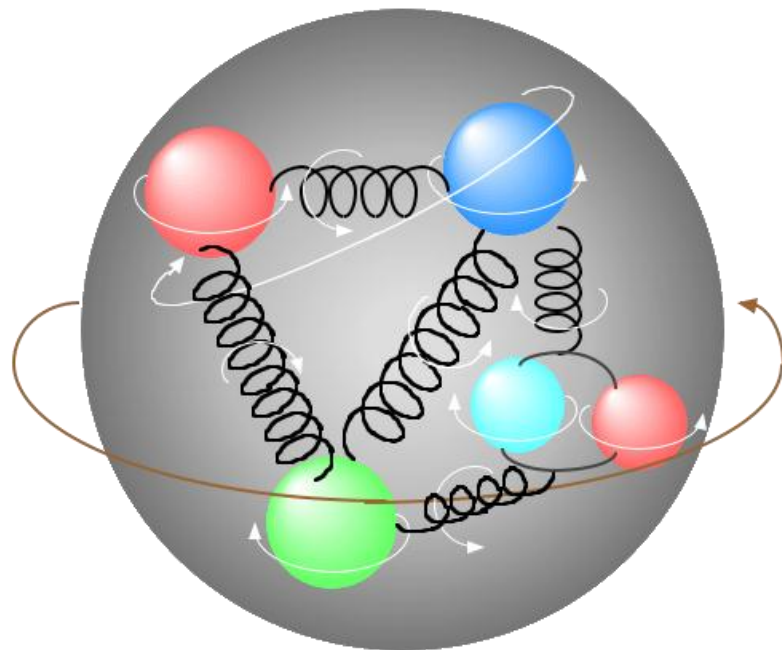
核子スピン

$$\frac{1}{2}\hbar = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$

$\Delta\Sigma$: クォークスピン

ΔG : グルーオンスピン

L_q, L_g : 軌道角運動量

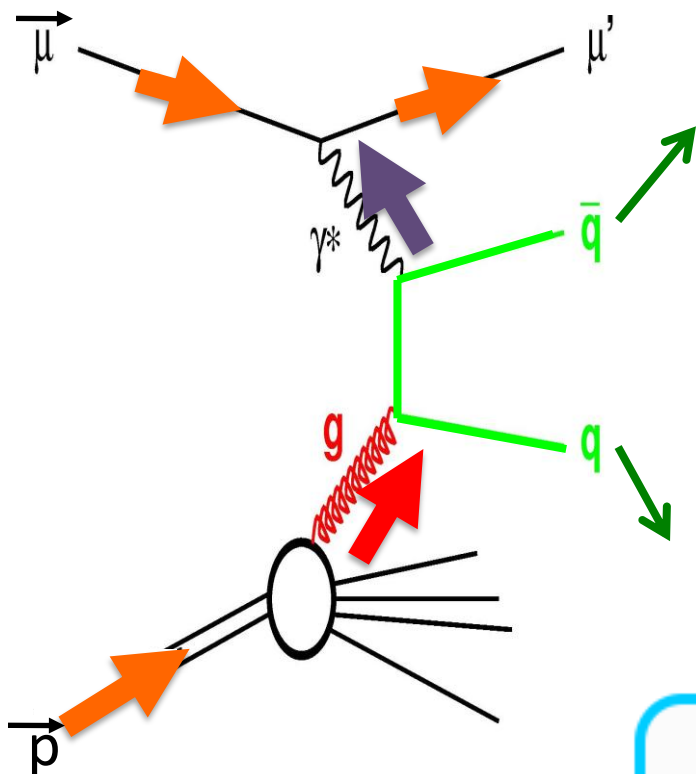


1980-90年代のCERNでのEMC実験、SMC実験、
米国SLACでの一連の実験における測定

$$\Delta\Sigma \approx 0.25$$

ΔG ? COMPASSでの目的

光子グルーオン融合とSemi-Inclusive深非弾性散乱測定



オープンチャーム ($q = c$)

- クリーンチャネル
(低物理バックグラウンド)
- 低統計量
- K、 π 粒子によるDメソン同定 by RICH

High p_T ハドロンペア ($q = u, d, s$)

- 高統計量
- 物理バックグラウンド

二重スピン非対称度測定

$$A_{\text{exp}} = \frac{N_{\rightarrow\leftarrow} - N_{\leftarrow\leftarrow}}{N_{\leftarrow\rightarrow} + N_{\leftarrow\leftarrow}} = P_B P_T f(A_{\parallel})$$

P_B : ビーム偏極度
 P_T : 標的偏極度
 f : ダイユーションファクター
 N : イベント数

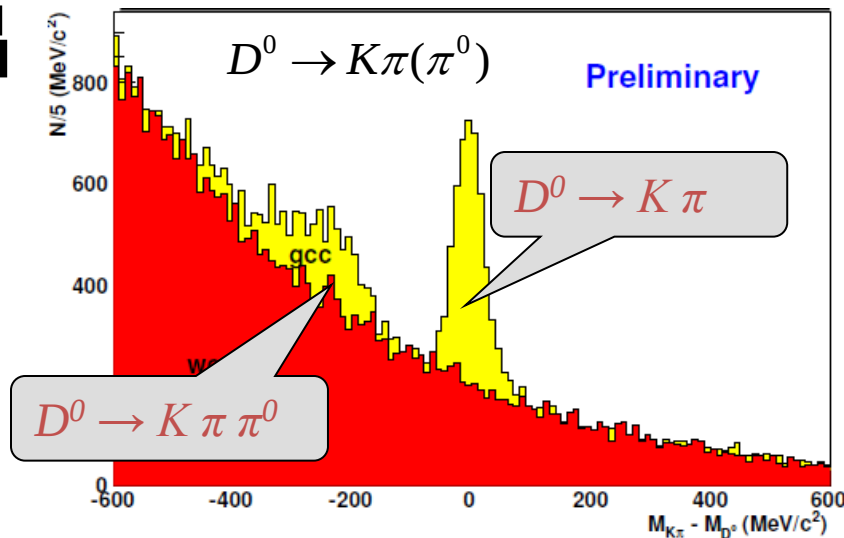
$\frac{\Delta G}{G}$ の抽出

グルーオン偏極度の抽出

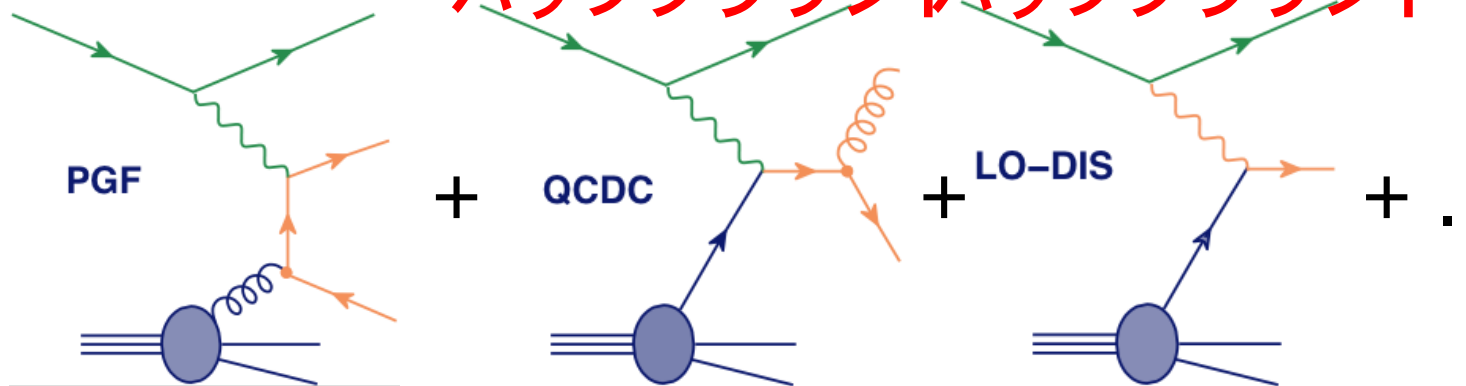
オープンチャーム

$$A_{\parallel}^{OC} \approx R_{PGF} \langle a_{LL} \rangle \frac{\Delta G}{G}$$

High p_T ハドロンペア



バックグラウンドバックグラウンド

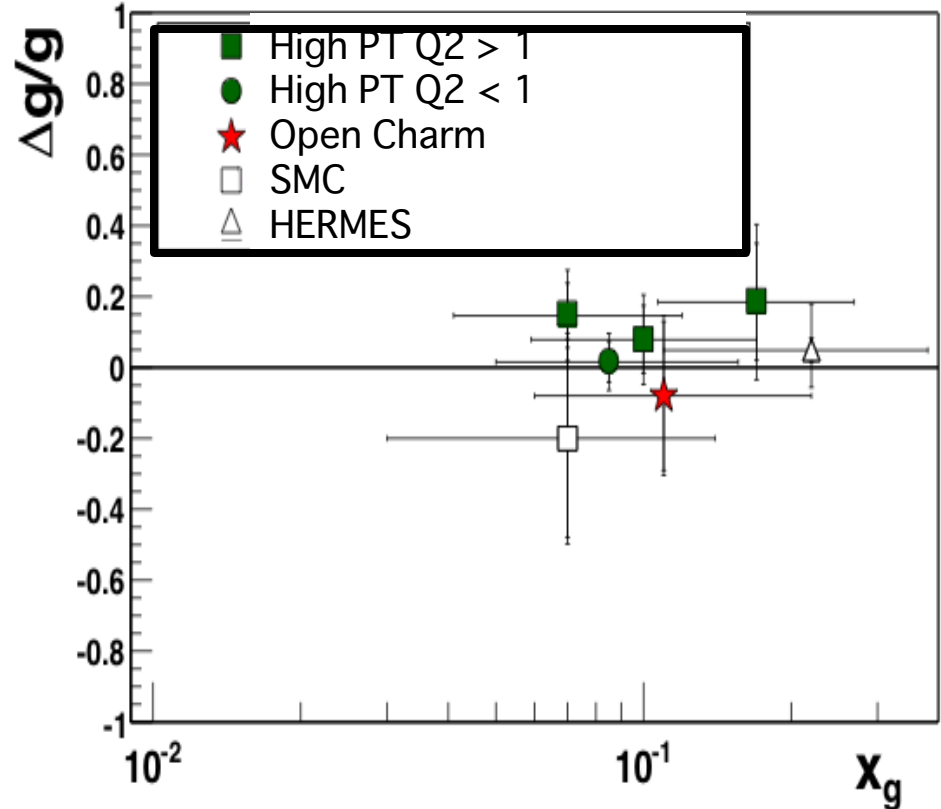


$$A_{\parallel}^{HighPT} \approx R_{PGF} \langle a_{LL}^{PGF} \rangle \frac{\Delta G}{G} + R_{QCDC} \langle a_{LL}^{QCDC} \rangle \frac{\Delta q}{q} + R_{LO} \langle a_{LL}^{LO} \rangle \frac{\Delta q}{q} + \text{Resolved photons Processes for low } Q^2$$

モンテカルロシミュレーションが必要

グルーオン偏極度測定の結果

- すべての結果は、ほぼゼロ。
- より多くのサブプロセスを考慮してそれらのアナライジングパワー $\langle a_{LL} \rangle$ への再評価を行ったNLOの結果もほぼゼロ。
- RHICでも同様の結果が確認されている。



$$\frac{1}{2}h = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$

クォークの軌道角運動量に注目

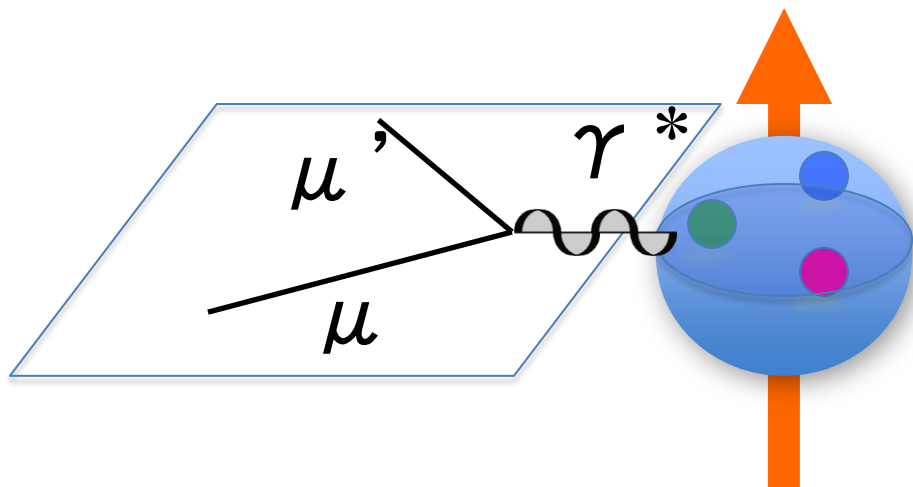
横偏極運動量依存(TMD)パートン分布

- 8つの横偏極運動量依存(TMD)パートン分布関数がある。

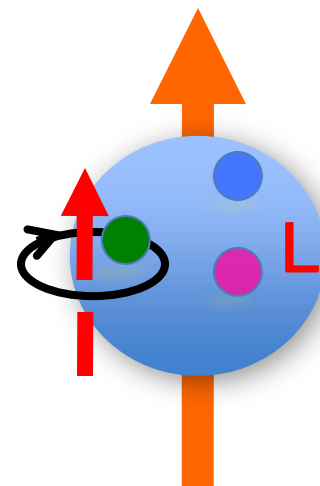
		nucleon polarization			
		U	L	T	
quark polarization	U	f_1  number density		$f_{1T}^\perp$  - 	Sivers
	L		g_1  -  helicity	g_{1T}  - 	
Boer–Mulders	T	$h_1^\perp$  - 	$h_{1L}^\perp$  - 	h_1  -  transversity $h_{1T}^\perp$  - 	Transversity Pretzelosity

Sivers関数

横偏極核子における無偏極クォークの振る舞いを表す関数
(transverselyに偏極した核子内のクォーク運動量分布関数)



Sivers関数がゼロではない
= クォークに軌道角運動量がある



Sivers 非対称度 $\Delta_0^T q(x)$ ($f_{1T}^\perp$)

Transversely 偏極標的におけるSI深非弾性散乱(DIS)断面積は、

$$d\sigma_{SIDIS} \propto [1 + a_1 \cdot \sin\Phi_C + \underbrace{a_2 \cdot \sin\Phi_S}_{\text{Sivers}} + \dots]$$

Sivers

$\Phi_S = \phi_h - \phi_s$:核子スピンの対する散乱ハドロンの方角

Siversアングルに対するモジュレーション

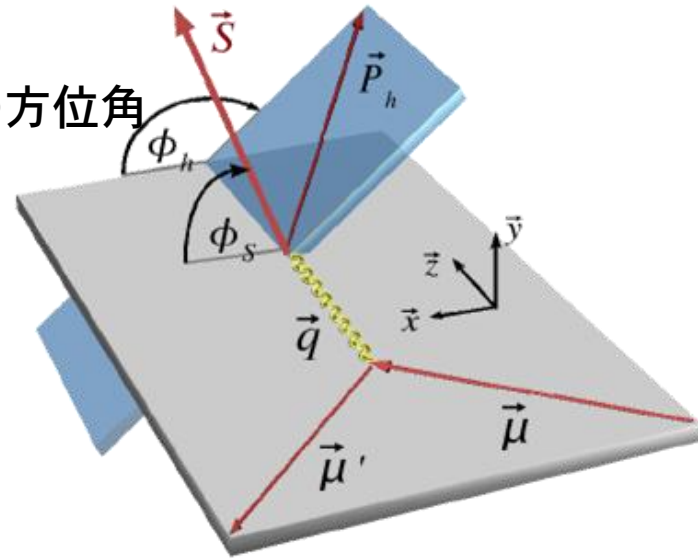
$$N_h^\pm(\Phi_S) = N_h^0 [1 \pm P_T \cdot A_{Siv} \cdot \sin\Phi_S]$$

Sivers非対称度

$$A_{Siv} = \frac{\sum_q e_q^2 \Delta_0^T q(x) D_q^h}{\sum_q e_q^2 q(x) D_q^h}$$

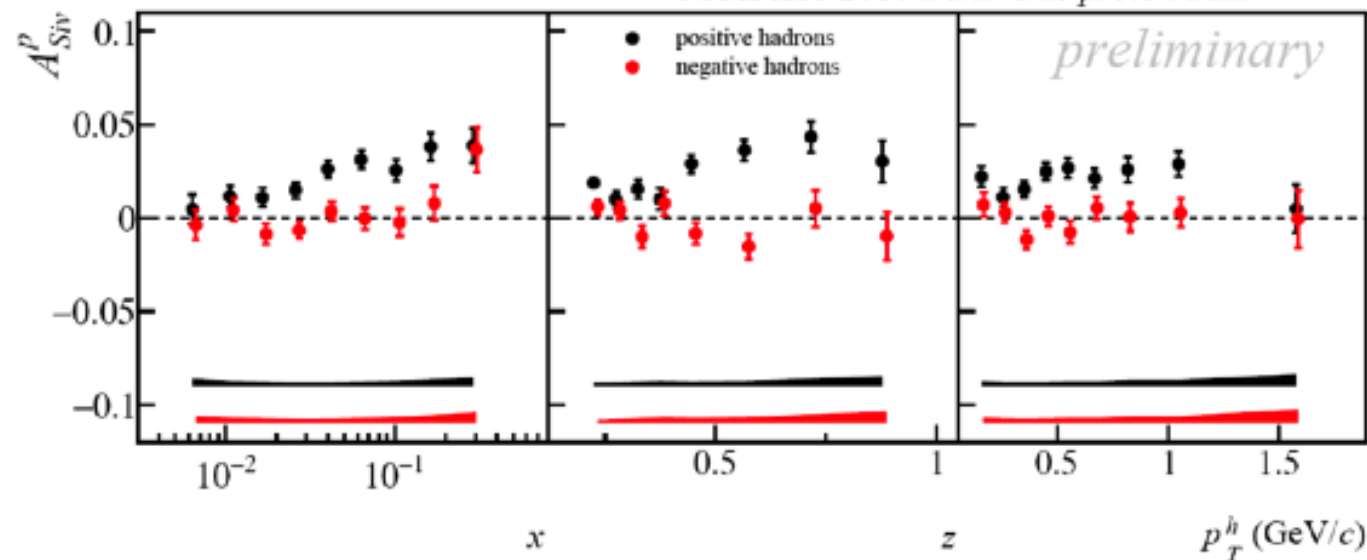
破砕関数:
他の実験で測定

1990年にSiversが提唱



測定結果（陽子、重陽子標的）

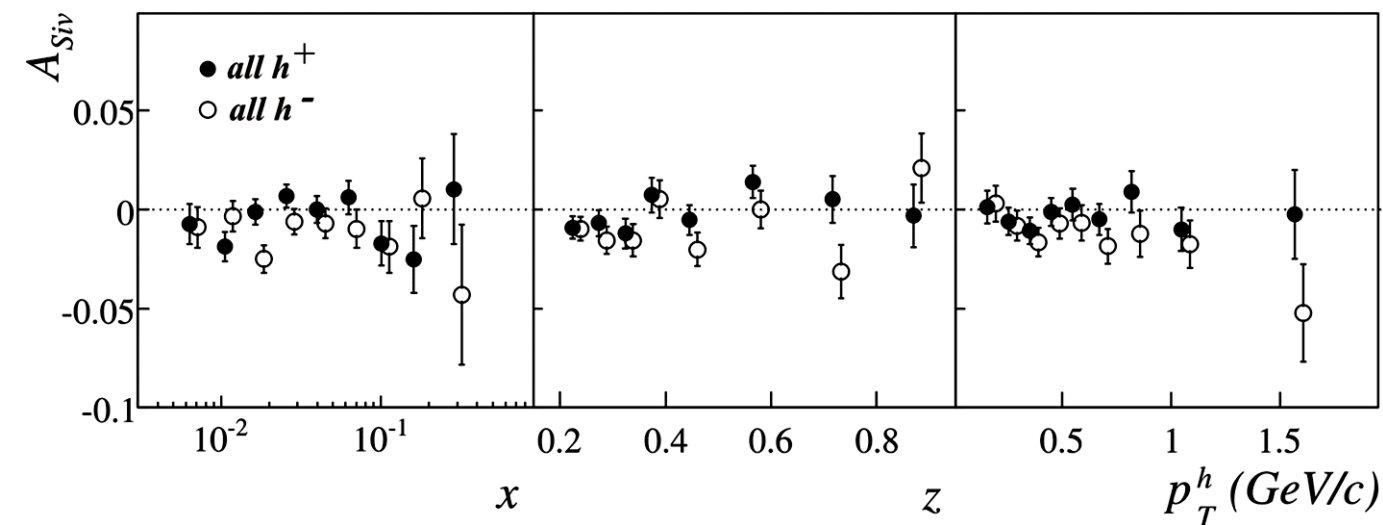
COMPASS 2010 transverse proton data



陽子

- Positive hadron
- Negative hadron

COMPASS 2002-2004



重陽子

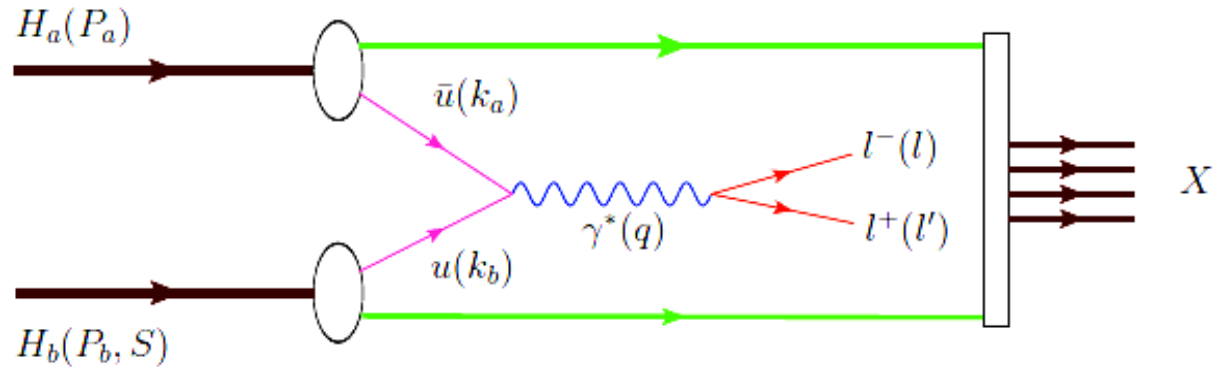
ほとんどゼロ

- Positive hadron
- Negative hadron

COMPASSの将来実験

- クォークの軌道角運動量をより詳しく調べる事が核子スピン構造解明に必要となる。
- 偏極ドレル・ヤン実験
- GPD実験

ドレル・ヤン 過程と角分布



$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi(\lambda + 3)} \left[1 + \lambda \cos^2 \theta + \mu \sin 2\theta \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right]$$

- The collinearity を仮定すると $\lambda=1$ と $\mu=\nu=0$ が暗示される。
- NA10 (CERN) と E615 (Fermilab)
 - ➡ $\cos 2\phi$ のモジュレーションが30%程度。
- ハドロンに内在しているクォークの横方向運動量 k_T
 - ➡ 標的とビームのクォークで2つの Boer-Mulders PDFs が相互作用する。

シングル偏極ドレル・ヤン散乱断面積

シングル偏極ドレル・ヤン断面積の最低次展開は、

$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{\alpha^2}{Fq^2} \hat{\sigma}_U \left\{ \left(1 + D_{[\sin^2 \theta]} \underline{A_U^{\cos 2\phi}} \cos 2\phi \right) \right. \\ \left. + \left| \underline{S_T} \right| \left[\underline{A_T^{\sin \phi_S}} \sin \phi_S \right. \right. \\ \left. + D_{[\sin^2 \theta]} \left(\underline{A_T^{\sin(2\phi + \phi_S)}} \sin(2\phi + \phi_S) \right. \right. \\ \left. \left. + \underline{A_T^{\sin(2\phi - \phi_S)}} \sin(2\phi - \phi_S) \right) \right] \left. \right\}$$

- $A_U^{\cos 2\phi} : (BM)_\pi \otimes (BM)_P$
- $A_T^{\sin \phi_S} : (f_1)_\pi \otimes (Sivers)_P$
- $A_T^{\sin(2\phi + \phi_S)} : (BM)_\pi \otimes (Pretz.)_P$
- $A_T^{\sin(2\phi - \phi_S)} : (BM)_\pi \otimes (Trans.)_P$

A : 方位角非対称度 :: 2つのPDFsのconvolutionで表せる

D : 減偏極ファクター

S : 標的スピンコンポーネント

$\hat{\sigma}_U$: part of the cross-section surviving integration over ϕ and ϕ_S

$F : 4\sqrt{(P_a \cdot P_b)^2 - M_a^2 M_b^2}$

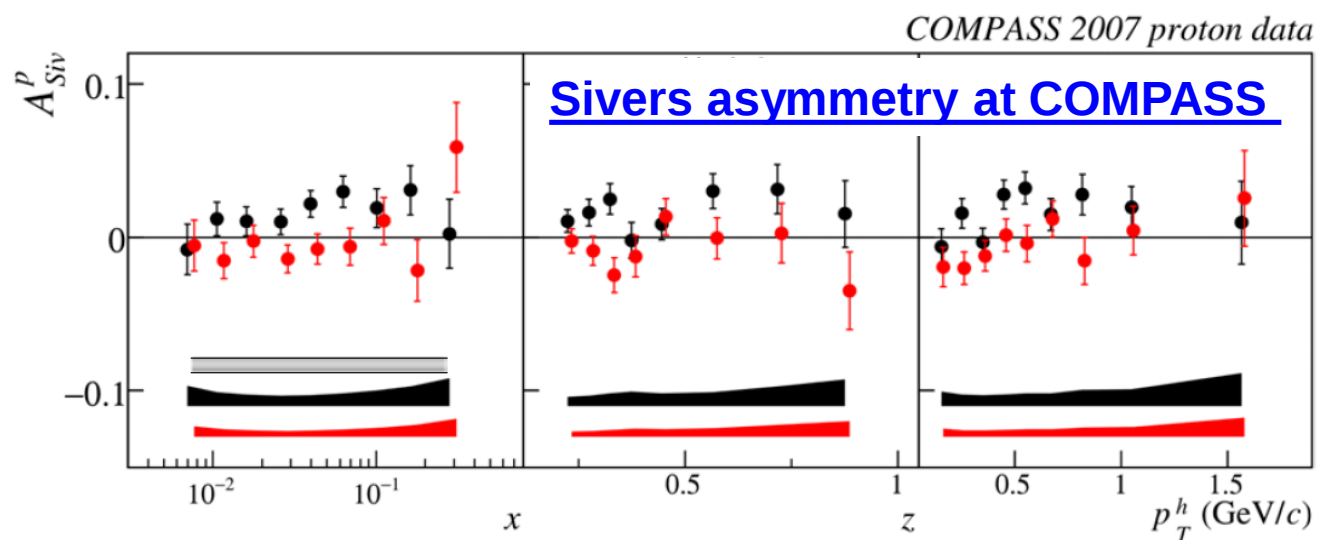
TMD パarton 分布関数(PDFs)の普遍性

Sivers と Boer-Mulders PDFs は “Time-reversal odd”なので、SIDISとDYで測定した場合、それらのサインが違ふ。

$$f_{1T}^{\perp}|_{DY} = -f_{1T}^{\perp}|_{SIDIS}$$

$$h_1^{\perp}|_{DY} = -h_1^{\perp}|_{SIDIS}$$

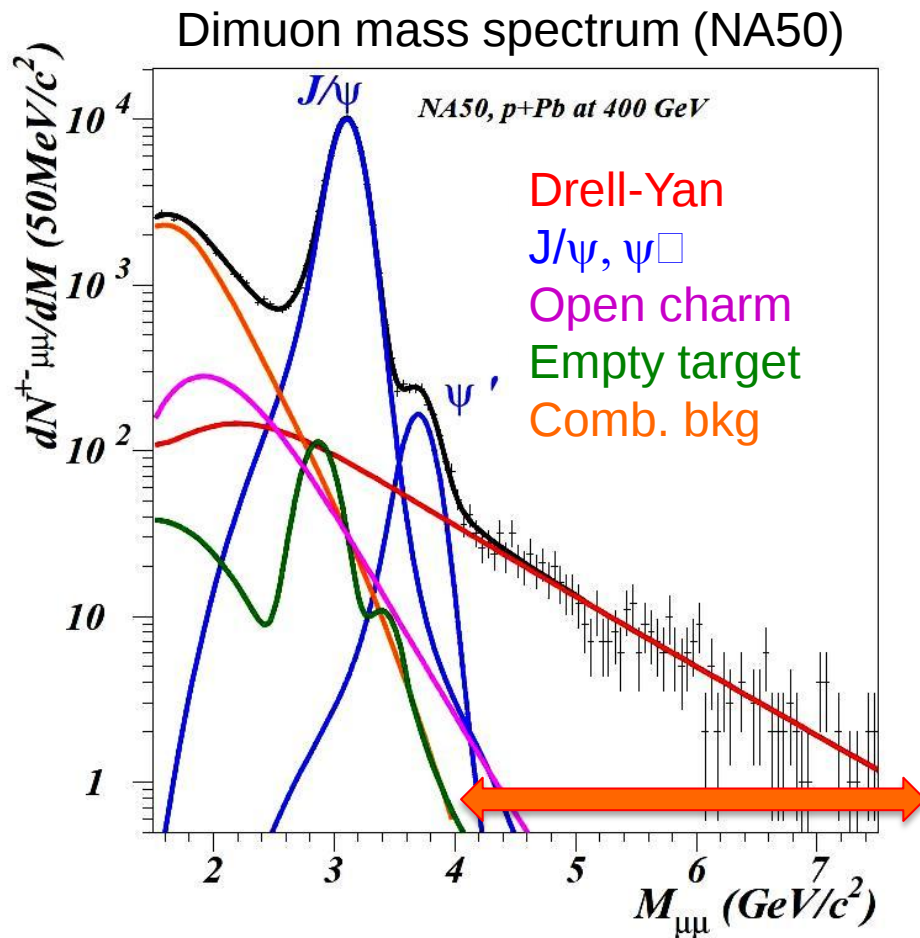
COMPASS実験では、その測定を同じスペクトロメーターと transversely 偏極標的を用いて行うことができる。



PLB692(2010)240

● Positive hadron
● Negative hadron

シグナルとバックグラウンド



2 バックグラウンド ソース

- 物理バックグラウンド
 $D, \bar{D}$ と J/ψ が崩壊し $\mu^+\mu^-X$ へ
- 組み合わせバックグラウンド
 π と K が崩壊し $\mu\nu$ へ

ドレル・ヤン測定では、 $4 < M \text{ GeV}/c^2$ がより良い領域。

イベント レイトと統計精度

ルミノシティ $1.2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ビーム強度 : 6×10^7 pions/s)

→ $4 < M < 9 \text{ GeV}/c^2$ において800 DY イベント/日

2年間のデータ収集 (280 days)を仮定すると

→ $4 < M < 9 \text{ GeV}/c^2$ 領域において230k イベント

これを非対称度の統計誤差で表わすると

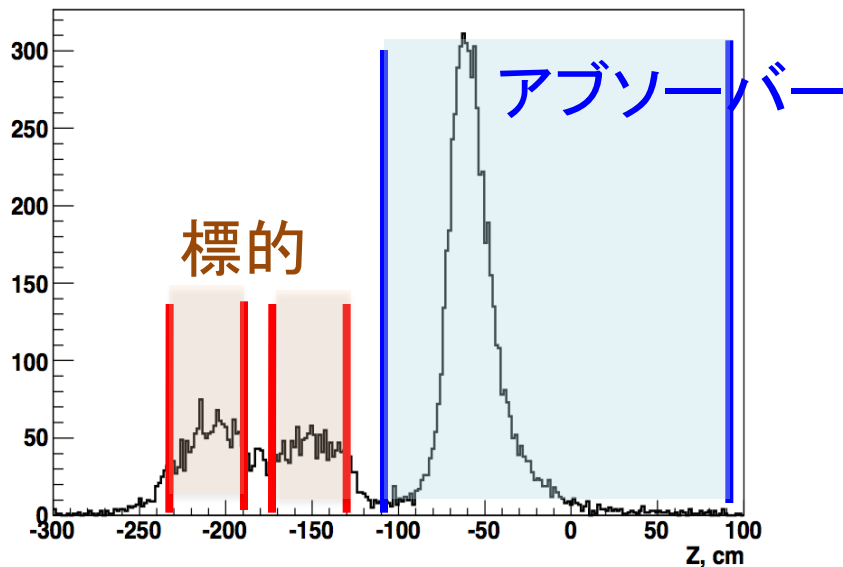
Asymmetry	Dimuon mass (GeV/c^2)		
	$2 < M_{\mu\mu} < 2.5$	J/ ψ region	$4 < M_{\mu\mu} < 9$
$\delta A_U^{\cos 2\phi}$	0.0020	0.0013	0.0045
$\delta A_T^{\sin \phi_S}$	0.0062	0.0040	0.0142
$\delta A_T^{\sin(2\phi+\phi_S)}$	0.0123	0.008	0.0285
$\delta A_T^{\sin(2\phi-\phi_S)}$	0.0123	0.008	0.0285

いくつかの x_F binsでの非対称度を検証できる。

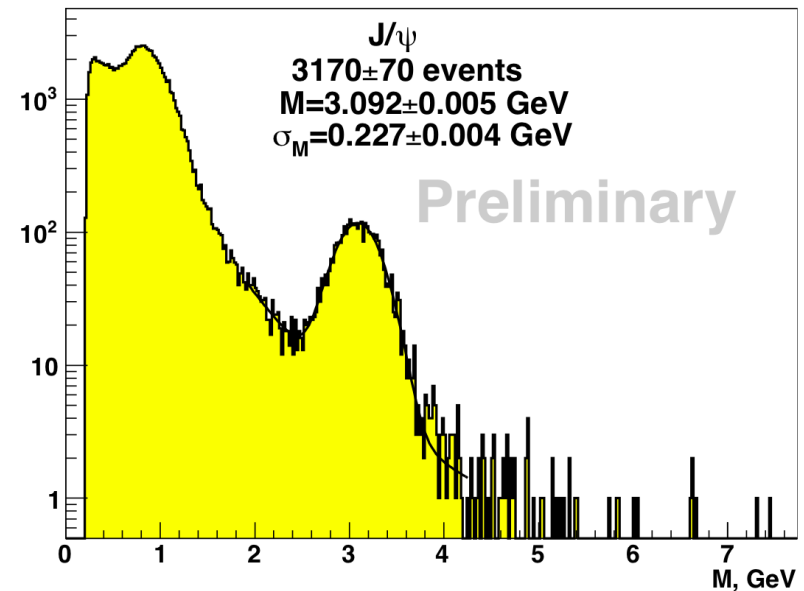
ビームテスト 2009

190 GeV π^- ビーム + CH₂(40cm+40cm) 標的
3日間データ収集

ビーム軸に対する散乱点再構築
分布 ($M > 2 \text{ GeV}/c^2$)



COMPASS DY beam test 2009



- 2つの標的セルとアブソーバーが区別できる
- 解像度は期待通り
- $M = 2 \text{ GeV}$ で組み合わせバックグラウンド がアブソーバーにより1/10に軽減

GPDプログラムの目的

GPD（一般化されたパートン分布）関数

4種類：

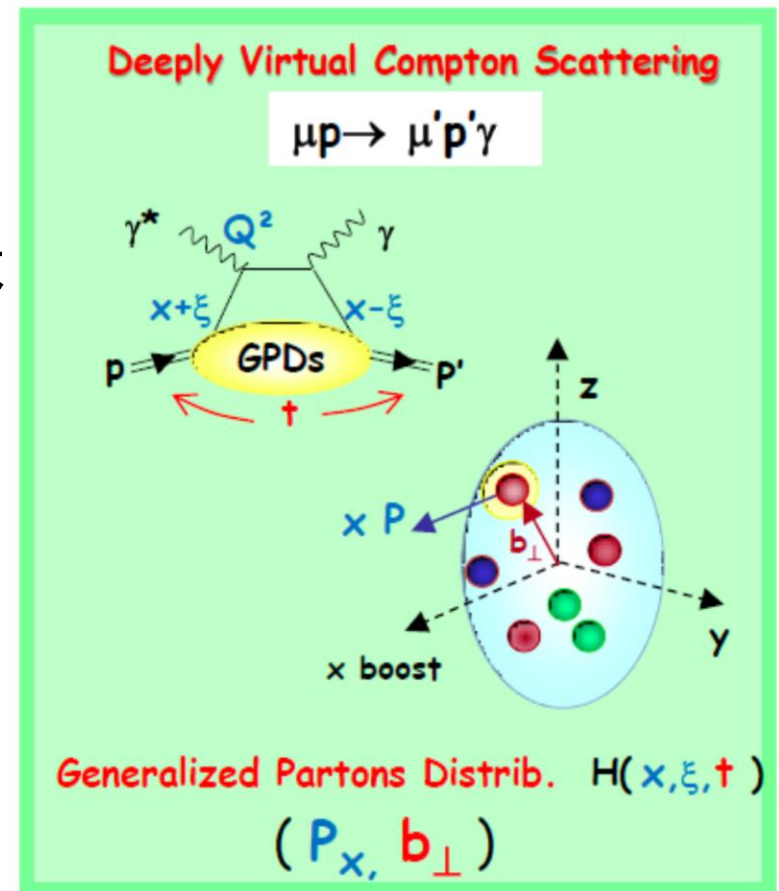
$$H, \tilde{H}, E, \tilde{E}(x, \xi, t)$$

Jiの和則：

クォークのスピンの軌道角運動量の和

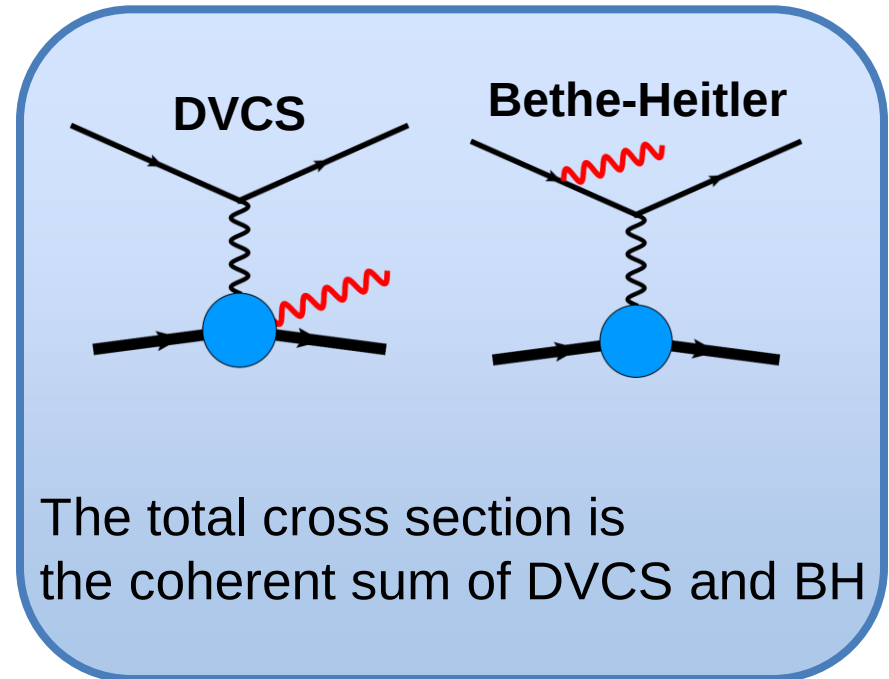
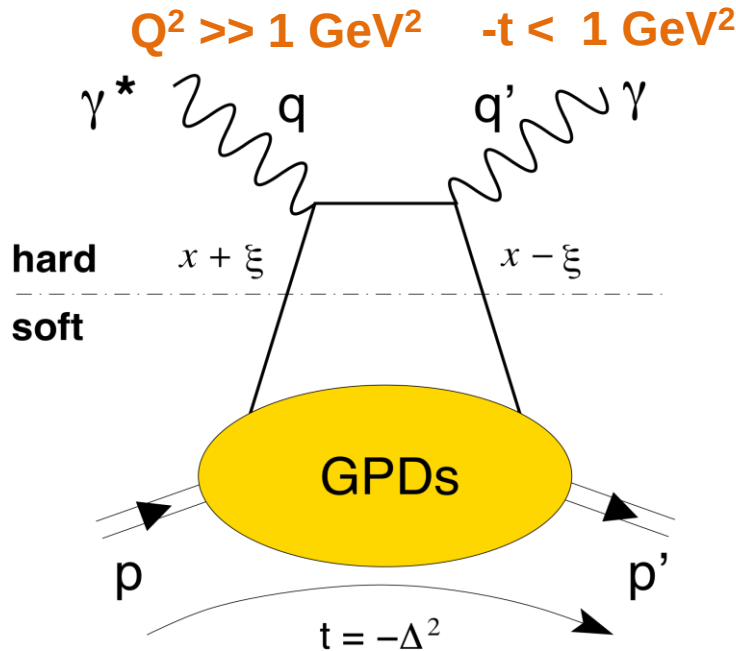
$$\lim_{t \rightarrow \infty, \xi \rightarrow 0} \frac{1}{2} \int_{-1}^1 x [H^q(x, \xi, t) + E^q(x, \xi, t)] dx = \frac{1}{2} \Delta q + L_z$$

核子の3次元像： $H(x, \xi, t)$ or $H(P_X, r_{y,z})$



仮想深コンプトン散乱（DVCS）過程

ExclusiveなDVCS過程よりGPDにアクセスできる。



偏極ミュオンビームと無偏極標的 : **GPD H**

$$d\sigma_{(up \rightarrow up\gamma)} = d\sigma^{BH} + d\sigma_{unpol}^{DVCS} + P_\mu d\sigma_{pol}^{DVCS} \\ + e_\mu a^{BH} \text{Re}(I) + e_\mu P_\mu \text{Im}(I)$$

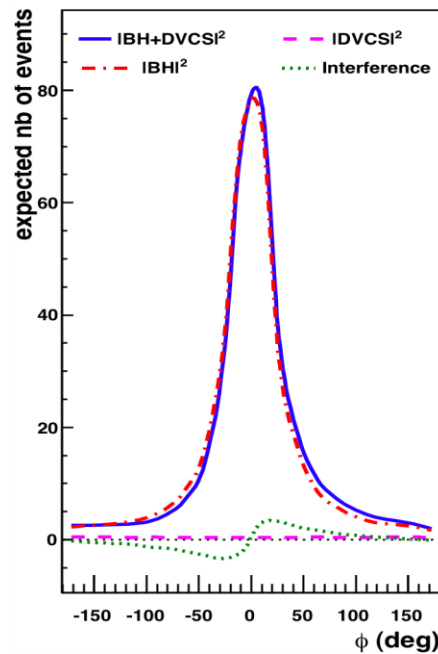
$d\sigma^{BH}$: well known

I : interference term

Bethe-Heitler と DVCS の散乱断面積 @ 160 GeV

$$d\sigma \propto |T^{DVCS}|^2 + |T^{BH}|^2 + \text{InterferenceTerm}$$

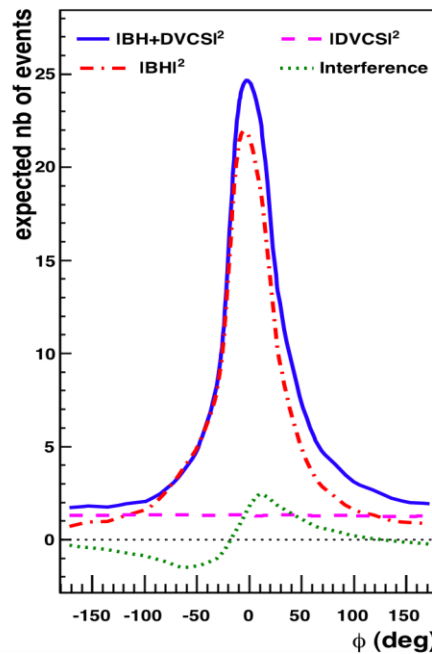
$0.005 < X_{BJ} < 0.01$



BH dominates

Reference yield

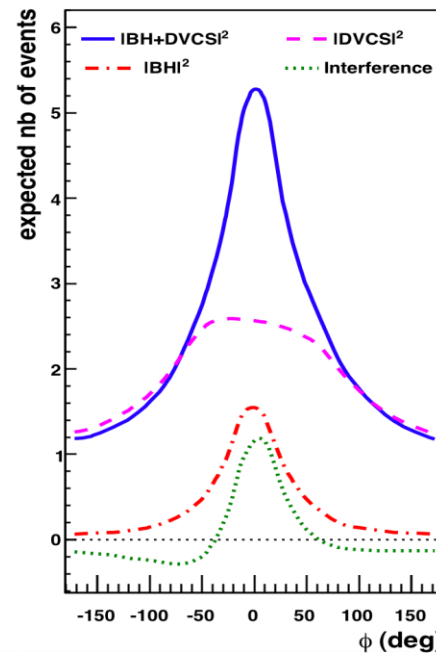
$0.01 < X_{BJ} < 0.03$



Interference

$\text{Re}T^{DVCS}$ & $\text{Im}T^{DVCS}$

$X_{BJ} > 0.03$

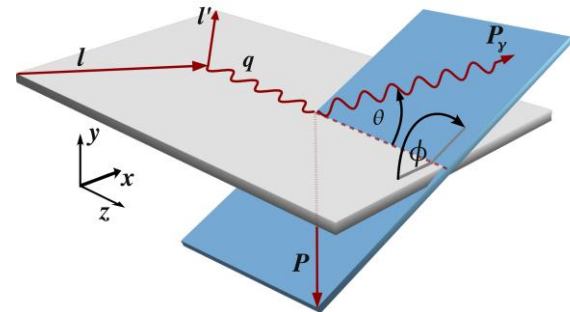


DVCS dominates

Transverse Image

MC: COMPASS setup with Ecal1+2

GPD H へのアクセス



ビームチャージとスピン和

$$S_{CS,U} = d\sigma^{+\leftarrow} + d\sigma^{-\rightarrow} = 2(d\sigma^{BH} + d\sigma_{unpol}^{DVCS} + e_{\mu} P_{\mu} \underline{\text{Im}(I)})$$

$$\longrightarrow s_1^I \sin \phi + s_2^I \sin 2\phi$$

GPD H へのアクセス

$$s_1^I \propto \text{Im}(F_1, \mathcal{H})$$

Compton form factor

ビームチャージとスピン差

BH 過程はビームチャージと偏極に対して依存していない。

$$D_{CS,U} = d\sigma^{+\leftarrow} - d\sigma^{-\rightarrow} = 2(P_{\mu} d\sigma_{pol}^{DVCS} + e_{\mu} \underline{\text{Re}(I)})$$

$$\longrightarrow c_0^I + c_1^I \cos \phi + c_2^I \cos 2\phi + c_3^I \cos 3\phi$$

Phase II

GPD E へのアクセス
横方向偏極陽子標的を用いたDVCSの測定

$$c_1^I \propto \text{Re}(F_1, \mathcal{H})$$

新しいコンセプトの偏極核子標的システムが必要

2008、2009年ビームテスト

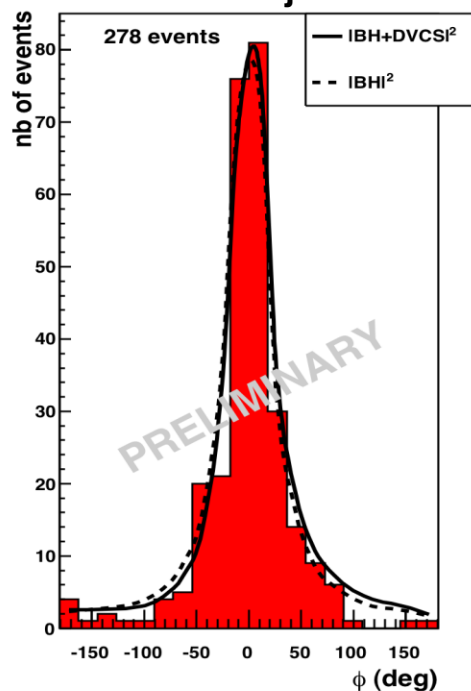
40cm 長の液体水素標的
1m 長の反跳陽子検出器

BHとDVCS イベントの測定

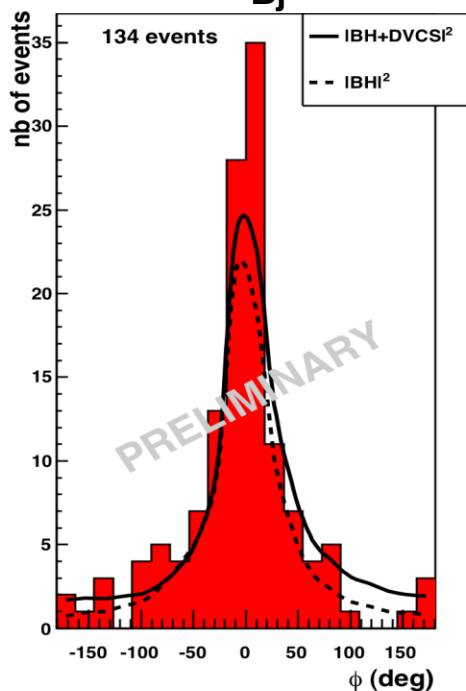
2008 : exclusive シングル光子生成イベントの測定

2009 : BH and DVCS イベントの測定

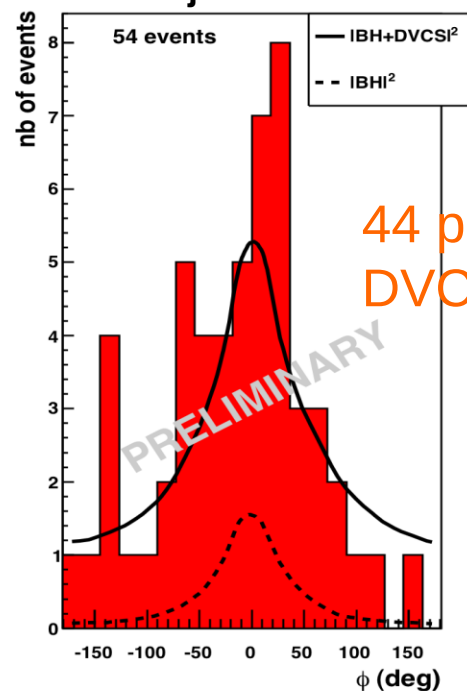
$0.005 < x_{Bj} < 0.01$



$0.01 < x_{Bj} < 0.03$



$x_{Bj} > 0.03$



Transverse イメージング

2 年間のデータ収集 (280日)
160 GeV 偏極ミューオンビーム

- μ^+ 70 日
- μ^- 210 日

2.5m 液体水素標的

t-slope パラメーター $B(x_B)$

簡単な仮定:

$$B(x_B) = B_0 + 2\alpha' \log(x_0/x_B)$$

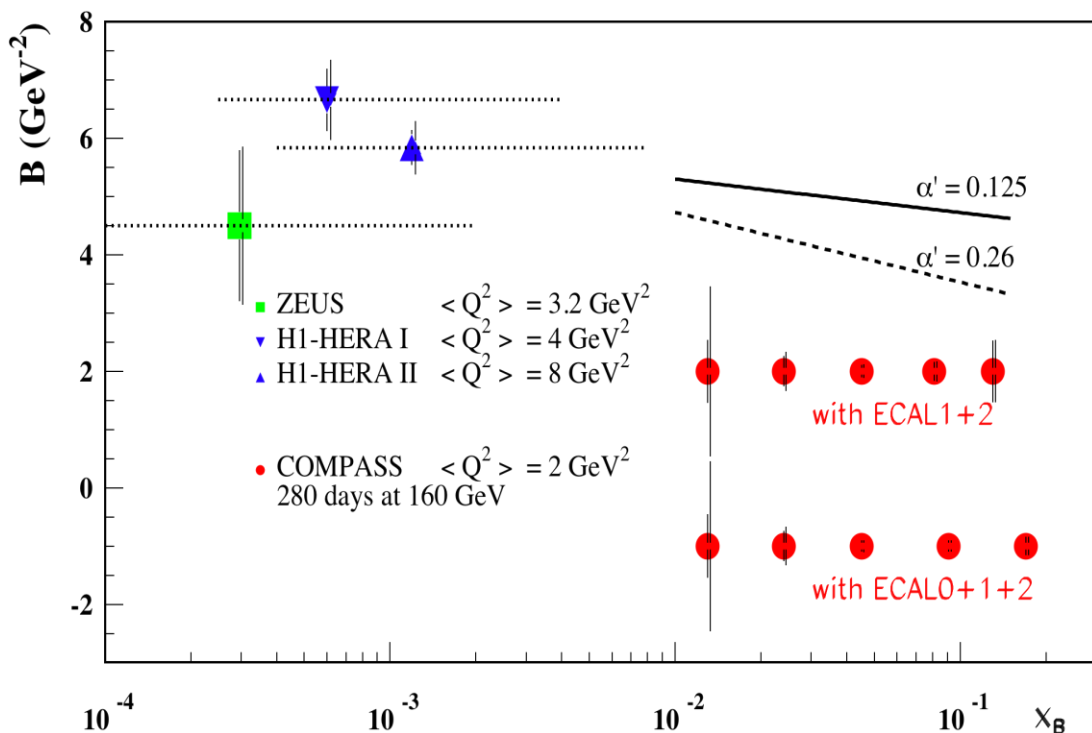
The exclusive 散乱断面積は

$$d\sigma/dt \propto \exp(-B(x_B)|t|)$$

$B(x_B)$ はモデルに頼らずに抽出できる

$$\langle r_{\perp}^2(x_B) \rangle \approx 2 \cdot B(x_B)$$

核子の transverse サイズ



COMPASS実験の偏極標的対する要請

統計と測定精度

$$\frac{\delta A^{\text{exp}}}{A^{\text{exp}}} = \frac{1}{\sqrt{2NP_B P_T f A^{\text{phys}}}}$$

- 大偏極標的
- 高偏極度(長緩和時間)
- 高ダイリューションファクター

COMPASS偏極標的

- 標的セル → 120cm長
- 磁場強度 → 2.5T (大口径)
- 温度 → 到達温度60mK、300mKで300mW
- 標的物質 → NH_3 (f=17%, 4000h @60mK, 0.6T)
 ^6LiD (f=50%)

&

マイクロ波による動的偏極法 (Dynamic Nuclear Polarization)



陽子偏極度 ~90%
重陽子偏極度 **50%以上**

COMPASS 偏極標的システム

(upgraded in 2006)

希釈冷凍機

- ・ 50mK
- ・ 300mKで350mWの冷却能力

磁石

- ・ 高均一度2.5Tソレノイド, 0.6Tダイポール
- ・ 180mrad アクセプタンス

標的セル

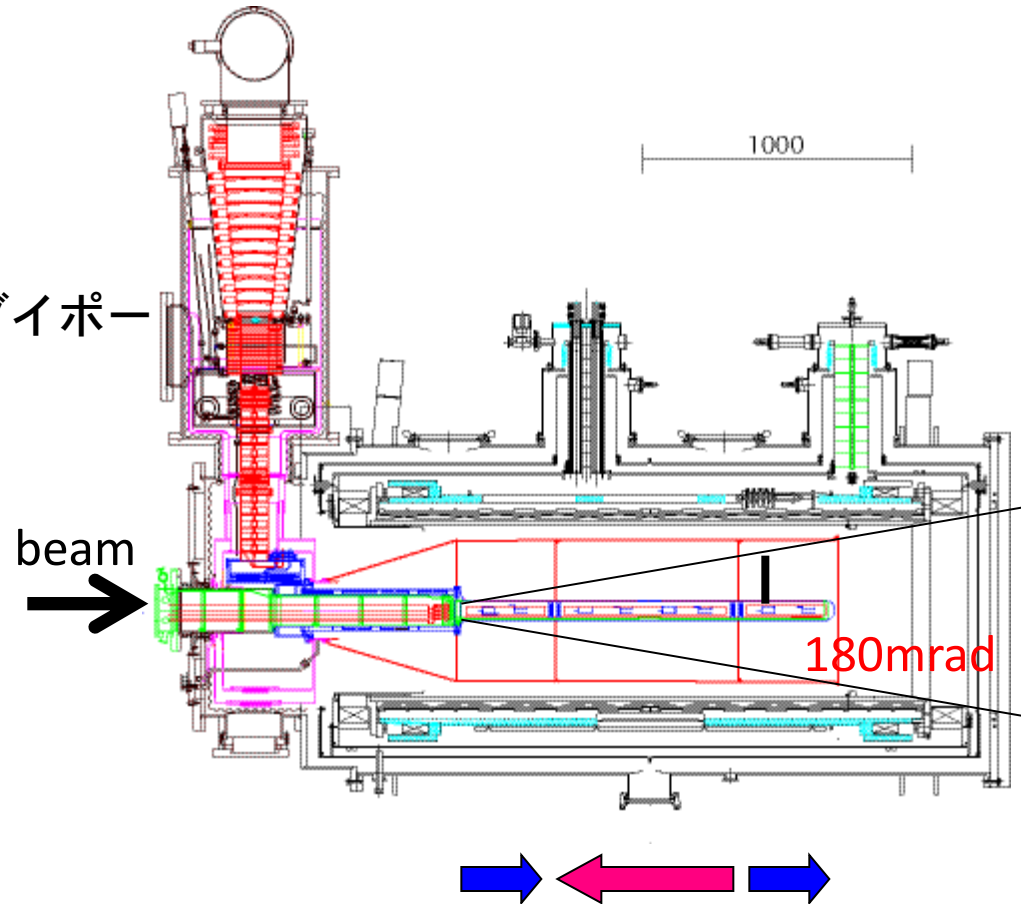
- ・ 3 セル (30, 60 30cm long)
- ・ 直径4cm

マイクロ波システム

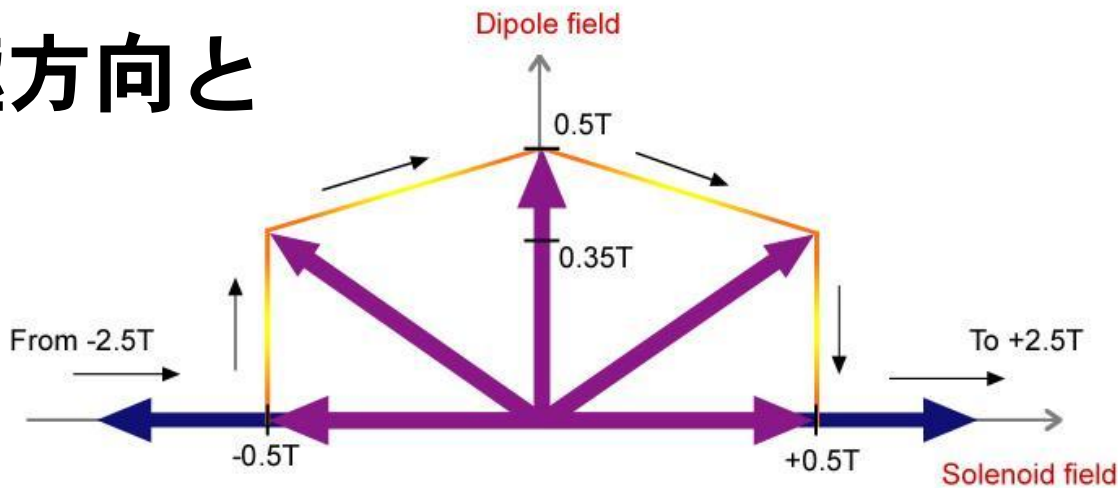
- ・ 2 EIO 発振器 (20W)

NMR システム

- ・ 10 チャンネル (3, 4, 3)

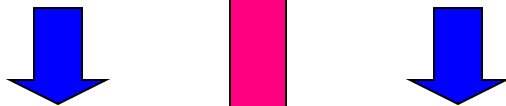
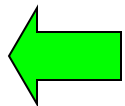
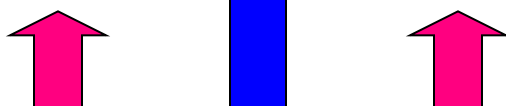
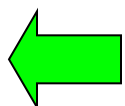
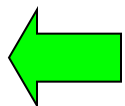
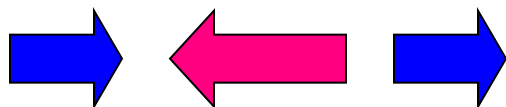
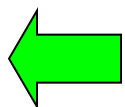


3つのセルの偏極方向と 磁場反転



muon
beam

target



Longitudinal polarization

Solenoid 2.5T

Transversal polarization

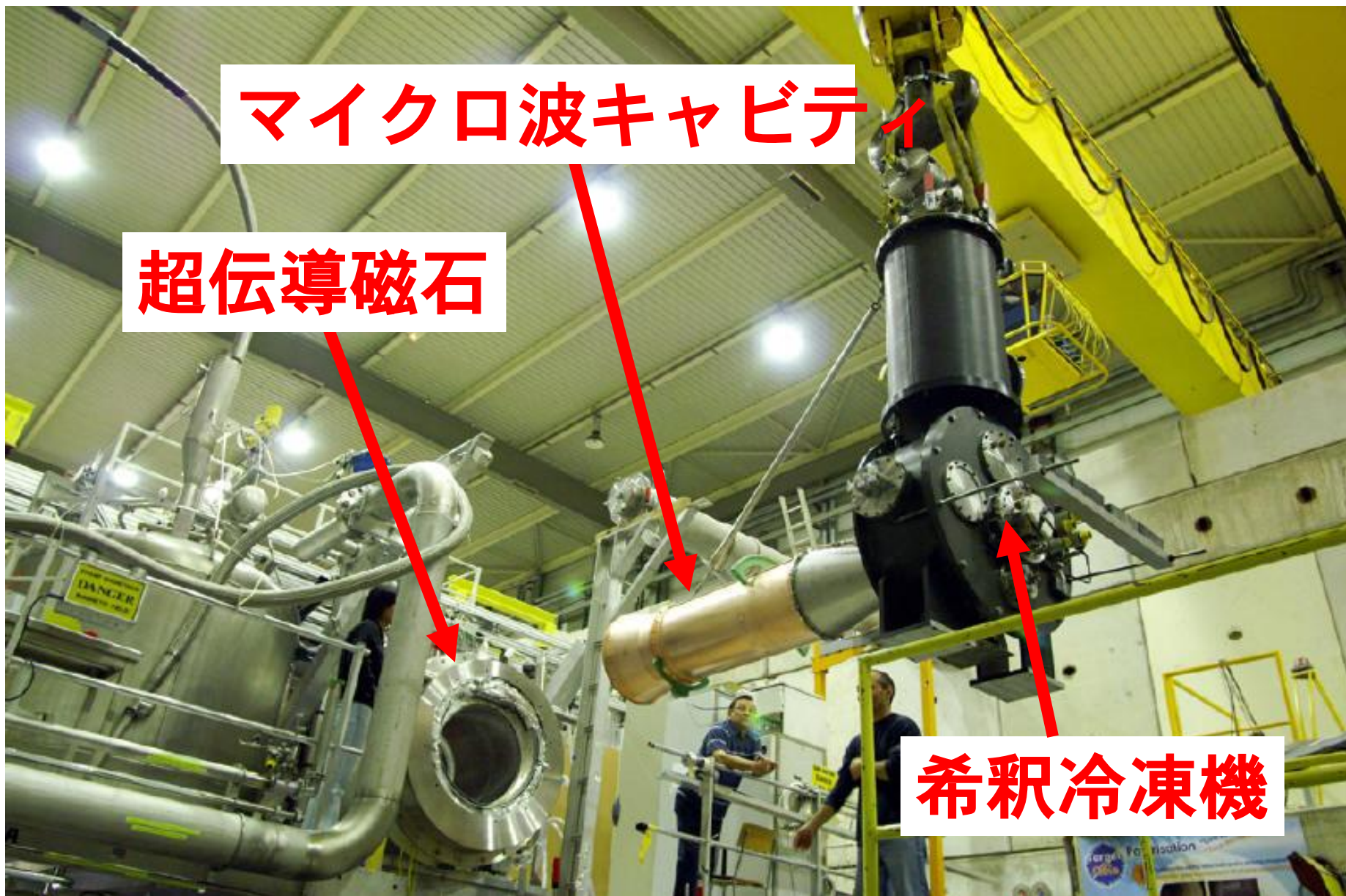
Dipole 0.6T



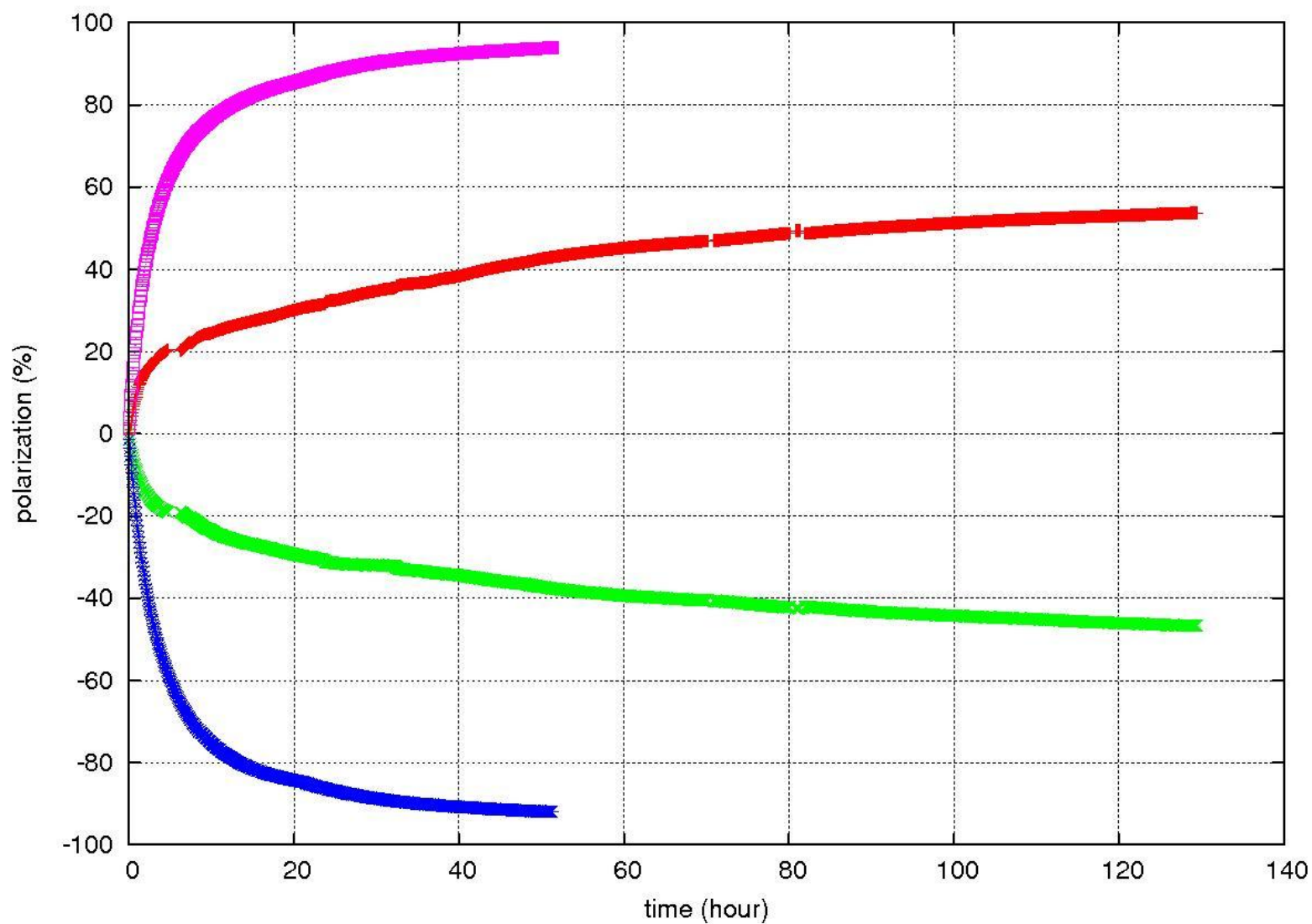
マイクロ波キャビティ

超伝導磁石

希釈冷凍機



偏極度成長時間



偏極度緩和時間

Temperature ~60mK

	Material	Magnetic field	Relaxation time
COMPASS	^6LiD	2.5 T	>15000 h
COMPASS	^6LiD	1.0 T	~ 10000 h
COMPASS	NH_3	1.0 T	~ 9000 h
COMPASS	NH_3	0.6 T	~ 4000 h
SMC	NH_3	0.5 T	500 h
COMPASS	^6LiD	0.0 T	2.5 min. for positive
COMPASS	NH_3	0.0 T	~ 70 min. for positive ~ 10 min. for negative

まとめ

- COMPASS実験では、核子スピン構造研究を行っている。
- 偏極標的システムは、この実験で重要であり、将来実験でも用いられる。
- GPD Eの測定を行うための、新たなコンセプトの偏極標的システムが必要。